

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



Phạm Duy Bình

**NGHIÊN CỨU TÍNH TOÁN ĐỘNG LỰC HỌC HẠT LƯU CHẤT
ĐA THÀNH PHẦN CÓ TRUYỀN NHIỆT, CHUYỂN PHA**

Chuyên ngành: Cơ học chất lỏng và chất khí
Mã số: 9 44 01 08

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ NGÀNH CƠ HỌC

Hà Nội – 2023

Công trình được hoàn thành tại: Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Vũ Văn Trường

Người hướng dẫn khoa học 2: PGS. TS. Nguyễn Thị Việt Liên

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Học viện, họp tại Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam vào hồi ... giờ ...', ngày ... tháng ... năm 202...

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Khoa học và Công nghệ
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Hạt lưu chất đa thành phần (sau đây gọi tắt là hạt đa thành phần) có tiềm năng ứng dụng rất lớn trong việc chế tạo pin năng lượng mặt trời. Có rất nhiều nhà nghiên cứu quan tâm đến nguồn năng lượng có thể tái tạo này vì chúng gần như vô tận và ít gây ra những tác hại tiêu cực đến môi trường như đối với nguồn nhiên liệu hóa thạch. Thành phần của pin mặt trời đề cập ở trên gồm các hạt bán dẫn đặc cầu được đặt trong một tấm lưới. Theo đó, giá trị sử dụng của hạt bán dẫn chỉ chủ yếu là một lớp mỏng bên ngoài hạt. Do đó, việc sử dụng hạt bán dẫn rỗng (hay hạt lưu chất đa thành phần có nhân khí bên trong đã bị hóa rắn) sẽ giúp tiết kiệm chất bán dẫn hơn là làm cho tấm lưới bán dẫn được nhẹ hơn mà hiệu quả chuyển đổi năng lượng là không đổi. Việc nghiên cứu sự chuyển pha của các hạt đa thành phần bán dẫn như vậy có thể giúp việc chế tạo những tấm pin mặt trời đại trà, rẻ hơn và rộng rãi hơn.

Việc nghiên cứu chuyển pha (trong luận án này là hóa rắn) hạt lưu chất đa thành phần còn giúp tìm ra giải pháp phá băng đá trên bề mặt cánh máy bay, tuabin gió, nâng cao tuổi thọ và hiệu suất máy. Hiện tượng băng đá này gặp nhiều ở vùng không khí lạnh. Theo đó, hạt nước trong không khí khi tiếp xúc với bề mặt cánh của máy bay hoặc tuabin gió sẽ bị hóa rắn nếu nhiệt độ tại bề mặt cánh nhỏ hơn nhiệt độ hóa rắn của nước. Các hạt nước như vậy có thể lẫn các bóng khí bên trong và chúng cũng bị hóa rắn khi bám vào các bề mặt cánh. Sự hóa rắn của hạt nước trên bề mặt cánh có thể là một nguyên nhân nghiêm trọng giảm hiệu suất và tuổi thọ của máy. Nguy hiểm hơn khi nó là một trong những nguyên nhân trong các vụ tai nạn hàng

không nghiêm trọng do ảnh hưởng tới khí động lực học của dòng khí khi qua cánh máy bay.

Ngoài ra, hạt lưu chất đa thành phần còn được sử dụng để loại bỏ các hạt nước bắn, trong công nghệ thực phẩm và sản xuất vật liệu hấp thụ âm thanh.

Chính vì những tiềm năng và ứng dụng của hạt đa thành phần nói trên nên nghiên cứu sinh lựa chọn đề tài “*Nghiên cứu tính toán động lực học hạt lưu chất đa thành phần có truyền nhiệt, chuyển pha*” với mong muốn điều khiển thời gian, hình dạng của hạt đa thành phần trong quá trình hóa rắn góp phần tìm ra giải pháp, nâng cao hiệu suất máy và chất lượng máy.

2. Mục tiêu nghiên cứu của luận án

Nghiên cứu quá trình truyền nhiệt, chuyển pha (ở đây là quá trình hóa rắn) của **hạt lưu chất rỗng** (một loại hạt lưu chất đa thành phần có nhân khí bên trong) bằng phương pháp theo dấu biên (front-tracking method).

3. Các nội dung nghiên cứu chính của luận án

Nội dung chính của luận án bao gồm:

Chương 1: Tổng quan về động lực học hạt đa thành phần

Chương 2: Nghiên cứu và xây dựng chương trình tính toán cho bài toán có truyền nhiệt, chuyển pha

Chương 3: Nghiên cứu quá trình truyền nhiệt, chuyển pha của hạt lưu chất rỗng trên một bề mặt lạnh

Chương 4: Nghiên cứu quá trình truyền nhiệt, chuyển pha của hạt lưu chất rỗng chịu ảnh hưởng của đối lưu cưỡng bức

Cuối cùng là phần **kết luận** đưa ra tóm tắt các kết quả đã đạt được và những vấn đề cần giải quyết trong tương lai.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

Trong chương này, các khái niệm một số thuật ngữ được trình bày như là hạt lưu chất đa thành phần, hạt lưu chất rỗng, hiện tượng chuyển pha của hạt lưu chất,... và chỉ ra một vài số không thứ nguyên chính được sử dụng trong luận án. Luận án cũng đưa ra hai phương pháp tạo ra hạt lưu chất đa thành phần đó là tách hạt của tia lưu chất và tách hạt của sợi lưu chất. Một số ứng dụng tiêu biểu của hạt đa thành phần cũng được trình bày như là ứng dụng trong công nghệ thực phẩm, y sinh, trong chế tạo vật liệu hấp thụ âm thanh,... đặc biệt là ứng dụng trong ngành chế tạo pin năng lượng mặt trời và nâng cao hiệu suất máy, phá bỏ băng đá trên bề mặt cánh máy bay và tuabin gió.

Qua khảo sát các công trình nghiên cứu sự hóa rắn của hạt lưu chất, các kết luận được rút ra như sau:

- Có rất nhiều nhà nghiên cứu quan tâm và xây dựng mô hình lý thuyết hóa rắn của hạt lưu chất. Tuy nhiên, các nghiên cứu trên chỉ tập trung vào sự hóa rắn hạt lưu chất đơn mà. Các công trình nghiên cứu cho hạt lưu chất đa thành phần còn thiếu.

- Các công trình thực nghiệm nghiên cứu sự hóa rắn của hạt lưu chất đơn rất nhiều tuy nhiên nghiên cứu về hạt lưu chất rỗng chỉ có vài công trình thực hiện.
- Nghiên cứu về sự chuyển pha của hạt lưu chất rỗng bằng phương pháp mô phỏng chưa được thực hiện cho tới thời điểm hiện tại. Điều này dẫn tới sự ra đời của đề tài này.

Cuối cùng là lựa chọn phương pháp để mô phỏng sự hóa rắn của hạt lưu chất rỗng. Các phương pháp phổ biến dùng để mô phỏng sự chuyển pha của hạt lưu chất bao gồm phương pháp tập mức, phương pháp thể tích lưu chất, phương pháp lưới Boltzmann và phương pháp theo dấu biên. Trong luận án này, phương pháp theo dấu biên được lựa chọn để mô phỏng sự chuyển pha của hạt lưu chất rỗng vì có những ưu điểm như xấp xỉ biên chính xác, đơn giản, tính được sức căng bề mặt chính xác.

CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU VÀ XÂY DỰNG CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN CHO BÀI TOÁN CÓ TRUYỀN NHIỆT, CHUYỂN PHA

Trong chương 2 này, luận án tập trung xây dựng một chương trình mô phỏng cho hạt lưu chất có truyền nhiệt, chuyển pha. Các lưu chất trong các bài toán trong luận án được giả sử là không nén được, không trộn lẫn và là lưu chất Newton. Các hệ phương trình sử dụng trong luận án là

- Phương trình Navier-Stokes

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \right] \\ + \int_f \sigma \kappa \delta (\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) \mathbf{n}_f \cdot dS + \rho (\mathbf{f} + \mathbf{g}) \end{aligned} \quad (2.1)$$

- Phương trình năng lượng

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p T \mathbf{u}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \int_f \dot{q} \delta (\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) \cdot dS \quad (2.2)$$

- Thông lượng nhiệt tại biên chuyển pha là

$$\dot{q} = k_s \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s - k_l \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_l \quad (2.3)$$

Do sự chênh lệch khối lượng riêng giữa hai pha rắn và pha lỏng, nên phương trình liên tục là

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{L_h} \left(\frac{1}{\rho_s} - \frac{1}{\rho_l} \right) \int_f \delta (\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) \dot{q} dS \quad (2.4)$$

Các thông số không thứ nguyên xuất hiện khi ta không thứ nguyên hóa phương trình Navier-Stokes và phương trình năng lượng. Ngoài ra, một vài thông số không thứ nguyên khác như là tỉ số giữa đặc tính các pha và hình học của hạt lưu chất rỗng cũng được sử dụng. Các thông số không thứ nguyên được sử dụng trong luận án là

$$\begin{aligned} Pr = \frac{C_{pl} \mu_l}{k_l}, St = \frac{C_{pl} (T_m - T_c)}{L_h}, Bo = \frac{\rho_l g R^2}{\sigma}, \\ Oh = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l R \sigma}}, We = \frac{\rho_l U_i^2 R}{\sigma}, Re = \frac{\rho_l U_i R}{\mu_l}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\theta_0 = \frac{T_0 - T_c}{T_m - T_c}, \rho_{sl} = \frac{\rho_s}{\rho_l}, \rho_{gl} = \frac{\rho_g}{\rho_l}, \mu_{gl} = \frac{\mu_g}{\mu_l}, R_{io} = \frac{R_i}{R_o} \quad (2.6)$$

$$k_{sl} = \frac{k_s}{k_l}, k_{gl} = \frac{k_g}{k_l}, C_{psl} = \frac{C_{ps}}{C_{pl}}, C_{pgl} = \frac{C_{pg}}{C_{pl}}, \varepsilon_0 = \frac{z_{ci0} - z_{co0}}{R} \quad (2.7)$$

Trong đó, Pr là số Prandtl đặc trưng cho tỷ số khuếch tán động lượng với khuếch tán nhiệt. St là số Stefan đại diện cho tỷ số nhiệt đặc trưng với nhiệt ẩn hóa lỏng. Bo là số Bond đặc trưng cho tỷ số giữa lực hấp dẫn với sức căng bề mặt. We là số Weber đại diện cho lực quán tính so với sức căng bề mặt. θ_0 là nhiệt độ không thứ nguyên ban đầu. ρ_{sl}, ρ_{gl} là tỷ số khối lượng riêng. μ_{sl}, μ_{gl} là tỷ số độ nhớt, R_{io} là tỉ số bán kính giữa hạt trong và hạt ngoài. k_{sl}, k_{gl} là tỷ số dẫn nhiệt, C_{psl}, C_{pgl} là tỷ số nhiệt dung đẳng áp. ε_0 là độ lệch tâm ban đầu giữa hạt bên trong và hạt bên ngoài. Đối với hạt lưu chất rỗng ta chọn bán kính ngoài làm cơ sở, tức là, $R = R_o$.

Các phương trình Navier-Stokes và năng lượng được rời rạc hóa để đưa vào chương trình tính toán.

Đầu tiên ta tách phương trình Navier-Stokes (2.1) thành 2 phương trình là

- Phương trình có thành phần áp suất

$$\frac{\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^*}{\Delta t} = -\frac{\nabla_h p}{\rho^n} \quad (2.8)$$

- Phương trình không có thành phần áp suất

$$\frac{\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^n}{\Delta t} = -\nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u})^n + \frac{1}{\rho^n} \left\{ \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \right] + \int_f \sigma \kappa \delta (\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) \mathbf{n}_f \cdot dS \right\}^n + (\mathbf{f} + \mathbf{g})^n \quad (2.9)$$

Ta lấy toán tử phân kỳ (toán tử div) hai vế phương trình (2.8) ta được

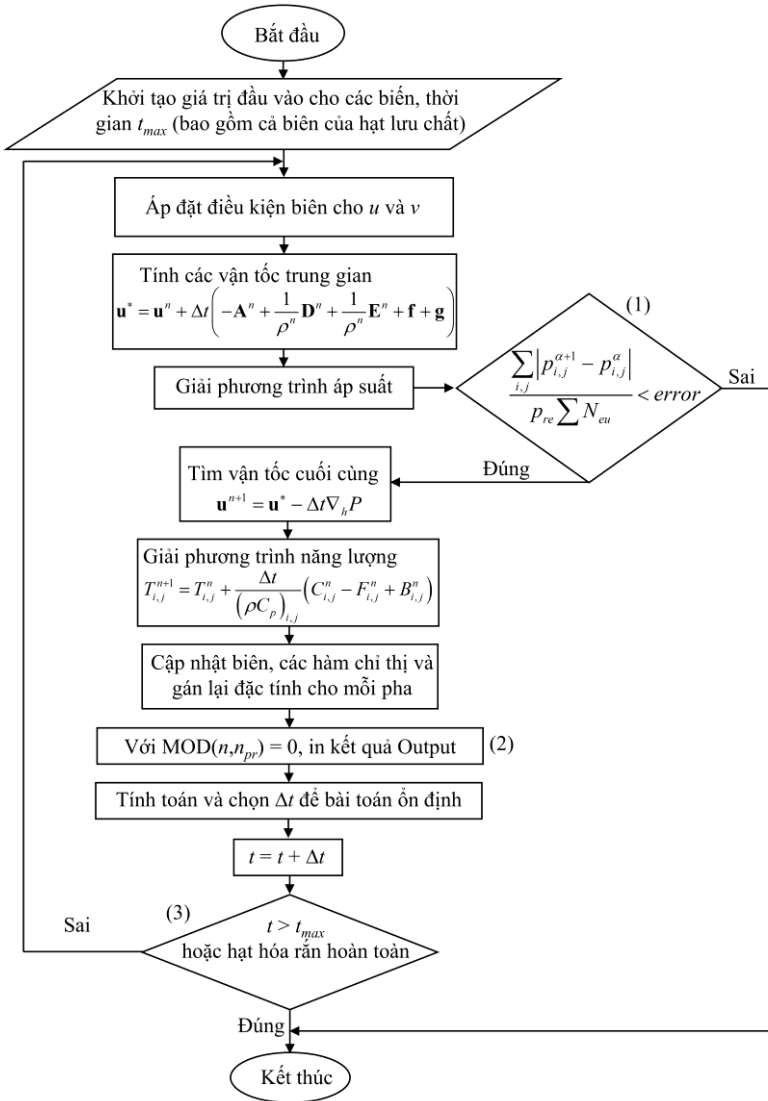
$$\nabla_h \cdot \left(\frac{1}{\rho^n} \nabla_h p \right) = \frac{1}{\Delta t} (\nabla_h \cdot \mathbf{u}^* - \nabla_h \cdot \mathbf{u}^{n+1}) \quad (2.10)$$

Vận tốc trung gian \mathbf{u}^* được tìm ở phương trình (2.9), tiếp theo sẽ tìm áp suất theo phương trình (2.10). Cuối cùng vận tốc tại thời điểm kế tiếp được tìm thông qua phương trình (2.8).

Sau khi tìm được vận tốc và áp suất. Ta tiến hành rời rạc phương trình năng lượng (2.2), ta có

$$\frac{C_p^n (T^{n+1} - T^n)}{\Delta t} = -\nabla \cdot (C_p T \mathbf{u})^n + \frac{1}{\rho^n} \left[\nabla \cdot (k \nabla T)^n + \left(\int_f \dot{q} \delta (\mathbf{x} - \mathbf{x}_f) \cdot dS \right)^n \right] \quad (2.11)$$

Một lược đồ giải (*Hình 2.1*) được xây dựng giúp ta hình dung các quá trình tính toán của chương trình theo các bước thời gian. Theo đó, các biến như khối lượng riêng (ρ), vận tốc (\mathbf{u}), áp suất (p), nhiệt độ (T),... được cập nhật qua mỗi vòng lặp tương ứng.



Hình 2.1. Lược đồ giải

Luận án sử dụng phương pháp theo dấu biên để mô phỏng bài toán chuyển pha. Theo đó, các biên phân cách được đại diện bởi các chuỗi điểm liên kết với nhau và chúng di chuyển trong một miền lưới cố định. Theo đó, mỗi bước thời gian tọa độ của các điểm đó được cập nhật theo

$$\mathbf{x}_f^{n+1} = \mathbf{x}_f^n + \mathbf{V}_f \Delta t \quad (2.12)$$

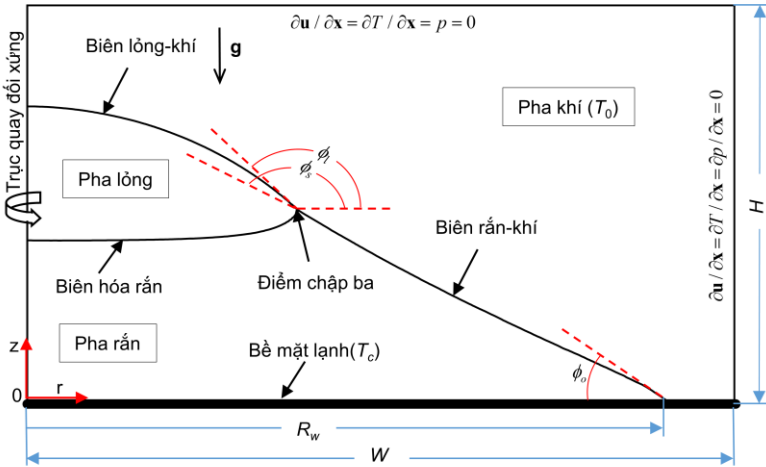
Với t và $t + \Delta t$ tương ứng với các bước tính toán n và $n + 1$. Vận tốc của các biên phân cách \mathbf{V}_f được nội suy từ các điểm lưới gần nhất hoặc điều kiện cân bằng năng lượng tại biên hóa rắn. Đặc tính của các pha được quy định bởi hai hàm chỉ thị I_1 và I_2 được tái thiết lại từ vị trí của các biên phân cách. Các hàm chỉ thị có giá trị bằng 1 trong pha này và bằng 0 ở các pha còn lại. Ta kí hiệu đặc tính của các pha như khối lượng riêng (ρ), độ nhớt (μ), nhiệt dung riêng đẳng áp (C_p) và hệ số dẫn nhiệt (k) là φ , ta có

$$\varphi = [\varphi_s I_1 + \varphi_l (1 - I_1)] I_2 + \varphi_g (1 - I_2) \quad (2.13)$$

Khác với bài toán hóa rắn của hạt lưu chất đơn, hạt lưu chất rỗng có hai điểm chấp ba pha. Góc phát triển tại các điểm chấp ba pha này được giả định được tính như sau

$$\phi_{gr} = \phi_s - \phi_l \quad (2.14)$$

Để kiểm chứng chương trình tính toán vừa xây dựng, các kết quả mô phỏng số hạt lưu chất đơn ($R_{io} = 0$) hóa rắn trên bề mặt lạnh đã có sự trùng khớp tốt với các kết quả thực nghiệm của các tác giả Pan và cộng sự, và Huang và cộng sự (mô hình bài toán có thể xem trong Hình 2.2). Từ đó cho thấy rằng chương trình tính toán vừa xây



Hình 2.2. Sự hóa rắn của một hạt lưu chất đơn trên bề mặt phẳng lạnh với miền tính toán $W \times H$ và bán kính ướt R_w

dụng có độ tin cậy cao, có thể sử dụng làm công cụ để nghiên cứu quá trình truyền nhiệt, chuyển pha của hạt lưu chất rỗng.

Kết luận chương 2

Trong chương này, một chương trình tính toán cho một hạt lưu chất có truyền nhiệt, chuyển pha được xây dựng. Theo đó, hai phương trình Navier-Stokes và phương trình năng lượng đã được rời rạc hóa để đưa vào chương trình tính toán.

Phương pháp theo dấu biên được sử dụng để nghiên cứu bài toán truyền nhiệt, chuyển pha của một hạt lưu chất. Theo đó, các biên phân cách giữa các pha được mô hình hóa bằng một chuỗi các điểm. Mỗi bước tính toán các điểm này di chuyển và được cập nhật

lại. Hai hàm chỉ thị I_1 và I_2 được sử dụng để xác định các đặc tính pha tại mọi điểm trên miền tính toán.

Các kết quả mô phỏng số đã có sự trùng khớp tốt với các kết quả thực nghiệm. Từ đó cho thấy rằng chương trình tính toán vừa xây dựng có độ tin cậy cao, có thể sử dụng làm công cụ để nghiên cứu quá trình truyền nhiệt, chuyển pha của hạt lưu chất rỗng.

Các kết quả so sánh chương trình tính toán với các công trình thực nghiệm đã được công bố trong 1 bài báo đăng trên tạp chí trong nước, cụ thể, bài báo số 6 trong “Danh mục các công trình khoa học của tác giả liên quan đến luận án”

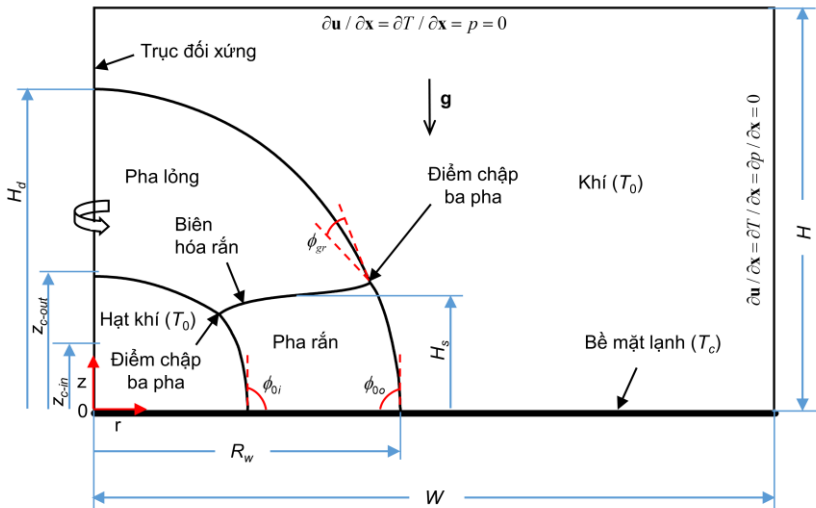
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU QUÁ TRÌNH TRUYỀN NHIỆT, CHUYỂN PHA CỦA HẠT LƯU CHẤT RỖNG TRÊN MỘT BỀ MẶT LẠNH

Một số các công trình thực nghiệm đã theo dõi quá trình hóa rắn của hạt lưu chất rỗng như công trình của Vũ và cộng sự, và Bahgat và cộng sự. Các công trình thực nghiệm này đều sử dụng một cặp vòi phun đồng trục để tạo ra một hạt lưu chất đơn nhân rỗng lỏng. Hạt đơn nhân rỗng lỏng này có thể hóa rắn trong quá trình rơi xuống (chưa tiếp xúc với bề mặt lạnh) hoặc sau khi tiếp xúc với một bề mặt lạnh nào đó. Chương này tập trung mô phỏng trường hợp thứ 2 đó là “*hạt lưu chất rỗng hóa rắn sau khi tiếp xúc với bề mặt lạnh*”.

Mô hình bài toán hạt lưu chất rỗng hóa rắn trên một bề mặt lạnh được trình bày trong *Hình 3.1*. Bề mặt lạnh được giữ ở nhiệt độ cố định T_c . Bài toán bao gồm ba pha không nén được, không trộn lẫn và có tính chất Newton là: rắn (với khối lượng riêng ρ_s), lỏng (với

khối lượng riêng ρ_l và độ nhớt μ_l) và khí (với khối lượng riêng ρ_g và độ nhớt μ_g).

Ban đầu, hạt lưu chất rỗng bao gồm một hạt lưu chất mà bên trong chứa một hạt bóng khí được giả sử là bán cầu. Khí bao quanh hạt được giả sử có tính chất giống với khí của hạt bóng khí. Do đó, pha lỏng của hạt lưu chất rỗng là lớp vỏ lỏng ngoài nằm giữa lớp khí bên trong và bên ngoài, và do vậy quá trình chuyển pha xảy ra chỉ ở lớp vỏ lỏng bên ngoài của hạt lưu chất rỗng. Một số công trình nghiên cứu đi trước đã khảo sát và mô phỏng của hạt lưu chất đơn hóa rắn trên một bề mặt lạnh cho thấy rằng hình dạng của hạt được giả sử là một phần của hình cầu tại lúc bắt đầu mô phỏng. Do đó, tại



Hình 3.1. Hạt lưu chất rỗng đối xứng hóa rắn trên một bề mặt lạnh được giữ tại nhiệt độ T_c . Bài toán được giải quyết bằng phương pháp theo dấu biên. z_{c-in} và z_{c-out} là tọa độ trọng tâm của hạt bóng khí bên trong và hạt lưu chất ngoài

thời điểm $t = 0$, hạt lưu chất rỗng ban đầu được giả sử có hình dạng cầu trong nghiên cứu này có thể chấp nhận được. Bán kính ban đầu của hạt ngoài và trong lần lượt là R_o và R_i . Pha lỏng có nhiệt độ hóa lỏng hay nhiệt độ chuyển pha T_m lớn hơn nhiệt độ T_c . Do đó, sự hóa rắn bắt đầu tại bề mặt của bề mặt lạnh và phát triển lên phía trên của hạt. Trong suốt quá trình hóa rắn, pha rắn (được kí hiệu bởi chỉ số dưới s), pha lỏng (được kí hiệu bởi chỉ số dưới l) và pha khí (được kí hiệu bởi chỉ số dưới g) giao nhau tại đường chập ba pha, trong nghiên cứu này là điểm chập ba pha. Hai điểm chập 3 pha xuất hiện xem *Hình 3.1*): một ở biên phân cách phía trong và một ở biên phân cách phía ngoài.

Động lực học bài toán được đặc trưng bởi các thông số không thứ nguyên dưới đây

$$Pr = \frac{C_{pl}\mu_l}{k_l}, St = \frac{C_{pl}(T_m - T_c)}{L_h}, Bo = \frac{\rho_l g R^2}{\sigma}, Oh = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l R \sigma}} \quad (3.1)$$

$$R_{io} = \frac{R_i}{R_o}, \theta_0 = \frac{T_0 - T_c}{T_m - T_c}, \rho_{sl} = \frac{\rho_s}{\rho_l}, \rho_{gl} = \frac{\rho_g}{\rho_l}, \mu_{gl} = \frac{\mu_g}{\mu_l} \quad (3.2)$$

$$k_{sl} = \frac{k_s}{k_l}, k_{gl} = \frac{k_g}{k_l}, C_{psl} = \frac{C_{ps}}{C_{pl}}, C_{pgl} = \frac{C_{pg}}{C_{pl}} \quad (3.3)$$

Để chọn độ phân giải lưới để sử dụng mô phỏng bài toán, một trường hợp mô phỏng số hạt lưu chất rỗng hóa rắn trên một bề mặt lạnh được thực hiện với các thông số $Pr = 0,01$, $St = 0,1$, $Bo = 0,1$, $Oh = 0,01$, $R_{io} = 0,5$, $\rho_{sl} = 0,9$, $\theta_0 = 1,0$, $k_{gl} = 0,005$, $\rho_{gl} = \mu_{gl} = 0,05$, $k_{sl} = C_{psl} = 1,0$ và $C_{pgl} = 0,24$, $\phi_{oi} = \phi_{oo} = 90^\circ$ và $\phi_{gr} = 0^\circ$. *Bảng 3.1* thể hiện sai số trung bình của chiều cao biên hóa rắn và chiều cao

Bảng 3.1. Sai số trung bình của lưới 128×256 so với độ phân giải lưới 256×512

| | | |
|-----------------------|--|---------------|
| Sai số trung bình (%) | Độ phân giải lưới 128×256 so với độ phân giải lưới 256×512 | |
| | Chiều cao biên hóa rắn | Chiều cao hạt |
| | 0,54% | 0,22% |

hạt lưu chất rỗng theo thời gian của hai lưới 128×256 và 256×512 cho miền tính toán $3R \times 6R$. Bảng 3.1 cho thấy rằng sai số trung bình của chiều cao biên hóa rắn và chiều cao của hạt lưu chất rỗng của lưới 128×256 so với của lưới 256×512 là rất nhỏ. Cụ thể, sai số trung bình chiều cao biên hóa rắn của lưới 128×256 so với của lưới 256×512 chỉ là 0.54%. Sai số trung bình giữa hai lưới này còn thấp hơn đối với chiều cao hạt lưu chất rỗng chỉ là 0,22%. Do hai lưới chọn để mô phỏng đạt độ trùng khớp cao, về mặt lý thuyết, ta có thể lựa chọn lưới 128×256 . Tuy nhiên, để cho kết quả mô phỏng chính xác hơn ở cuối quá trình hóa rắn của hạt, ta chọn lưới với độ phân giải 256×512 để mô phỏng bài toán.

Bài toán xem xét một vài thông số không thứ nguyên chính ảnh hưởng lên quá trình hóa rắn của hạt lưu chất rỗng trên bề mặt lạnh như Bo trong dải 0,18 – 3,16, Pr trong dải 0,01 – 1,0, St trong dải 0,032 – 1,0, ρ_{sl} trong dải 0,8 – 1,2, R_{io} trong dải 0,2 – 0,7 và góc phát triển ϕ_{gr} trong dải $0^\circ - 25^\circ$. Các thông số hình học cũng được xem xét như góc ước ngoài ϕ_{0o} trong dải $60^\circ - 130^\circ$ và góc ước trong ϕ_{0i} trong dải $50^\circ - 120^\circ$ cũng được xem xét. Các thông số khác được giữ không đổi trong suốt quá trình tính toán như $Oh = 0,01$, $\theta_0 = 1,0$, $k_{gl} = 0,005$, $\rho_{gl} = \mu_{gl} = 0,05$, $k_{sl} = C_{psl} = 1,0$ và $C_{pgl} = 0,24$.

Kết luận chương 3

Các thông số không thứ nguyên chính ảnh hưởng đến quá trình hóa rắn của hạt lưu chất rỗng trên một bề mặt lạnh được khảo sát. Cụ thể, việc thay đổi độ dày của vỏ lưu chất bằng cách thay đổi bán kính của hạt khí bên trong ở bên trong thành phần R_{io} , chỉ ra rằng tăng kích cỡ của hạt bóng khí dẫn đến thời gian hoàn thành hóa rắn dài hơn trong khi nó không ảnh hưởng tới chiều cao của toàn bộ hạt khi quá trình hóa rắn kết thúc.

Chiều cao của hạt bóng khí bên trong của hạt hóa rắn không bị ảnh hưởng nhiều bởi việc tăng số Bo (tức là, lực hấp dẫn đóng vai cho chi phối lớn hơn lực sức căng bề mặt) trong khoảng 0,18 – 3,16 hoặc St (tức là giảm nhiệt ẩn chuyên pha) trong dải từ 0,032 – 1,0. Tuy nhiên, việc tăng Pr (tức là, tăng ảnh hưởng của khuếch tán động lượng so với khuếch tán nhiệt) từ 0,01 – 1,0 làm giảm chiều cao của hạt bóng khí của hạt hóa rắn. Nếu ta tăng Pr và Bo sẽ giảm chiều cao của toàn bộ hạt hóa rắn.

Nghiên cứu về sự thay đổi thể tích hóa rắn bằng cách thay đổi tỉ số khối lượng riêng của pha rắn lên pha lỏng ρ_{sl} , chỉ ra rằng việc tăng giá trị của số ρ_{sl} từ 0,8 đến 1,2 sẽ giảm chiều cao hóa rắn của hạt hóa rắn và chiều cao hạt bóng khí của nó và dẫn đến quá trình hóa rắn kết thúc sớm hơn.

Các ảnh hưởng của các thông số hình học (góc ướt trong (ϕ_{oi}) trong dải $50^\circ - 120^\circ$ và góc ướt ngoài (ϕ_{oo}) trong dải $60^\circ - 130^\circ$) và góc phát triển (ϕ_{gr} trong dải $0^\circ - 25^\circ$) cũng được nghiên cứu. Kết quả mô phỏng số cho thấy rằng khi góc ướt trong giảm và góc ướt ngoài tăng hay là $\phi_o = 180^\circ - \phi_{oi} = \phi_{oo}$ và $\phi_{gr} = 0^\circ$, chiều cao của hạt bóng

khí và hạt ngoài và thời gian hóa rắn tăng, trong khi, độ tăng chiều cao của hạt lưu chất rỗng giảm sau khi quá trình hóa rắn kết thúc. Các ảnh hưởng tương tự cũng được khảo sát chỉ tăng góc ướt ngoài (tức là, $\phi_{oi} = 90^\circ$ và $\phi_{gr} = 0^\circ$). Điều đó chỉ ra rằng việc tăng ϕ_{oi} từ 50° đến 120° với $\phi_{oo} = 90^\circ$ và $\phi_{gr} = 0^\circ$ không ảnh hưởng tới hình dạng hạt ngoài nhưng dẫn đến việc tăng thời gian hóa rắn.

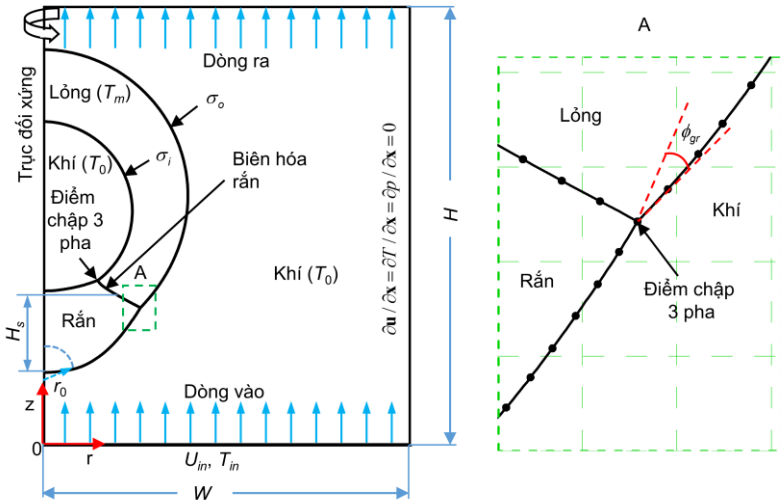
Thời gian hóa rắn, chiều cao của hạt lưu chất rỗng và độ tăng chiều cao tăng khi góc phát triển tăng. Tuy nhiên, việc tăng góc phát triển dẫn đến một sự giảm chiều cao của hạt bóng khí sau khi quá trình hóa rắn kết thúc. Bên cạnh đó, chỉ có ϕ_{gr} ảnh hưởng tới góc côn tại đỉnh của hạt ngoài, tức là, việc tăng ϕ_{gr} dẫn đến biên ngoài côn hơn. Nói cách khác, việc thay đổi góc ướt ngoài và trong, khi giữ ϕ_{gr} không đổi không ảnh hưởng tới góc đỉnh.

Các kết quả của chương 3 đã được công bố trong 2 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCIE (Q1), cụ thể, bài báo số 1 và 2 trong “Danh mục các công trình khoa học của tác giả liên quan đến luận án”

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU QUÁ TRÌNH TRUYỀN NHIỆT, CHUYỂN PHA CỦA HẠT LƯU CHẤT RỖNG CHỊU ẢNH HƯỞNG CỦA ĐỐI LƯU CƯỜNG BỨC

Như chương 3 đã đề cập, các hạt lưu chất rỗng lỏng có thể hóa rắn trước khi chạm tới bề mặt lạnh như các công trình thực nghiệm đã thể hiện. Trong chương này, bài toán mô phỏng chuyển pha của hạt lưu chất rỗng như vậy được thực hiện.

Ban đầu, giả sử hạt lưu chất rỗng có dạng hình cầu và đối xứng lơ lửng trong một môi trường lạnh. Hạt lưu chất rỗng bao gồm một nhân khí (hạt bóng khí) bên trong một vỏ lưu chất (hạt ngoài) bắt đầu hóa rắn tại một nhân hóa rắn với bán kính r_0 được đặt ở phía đáy của hạt. Nhiệt độ của nhân hóa rắn được giữ không đổi là T_c . Trong khi đó, T_m kí hiệu cho nhiệt độ của vỏ lưu chất và là nhiệt độ chuyển pha của lưu chất. Bán kính ban đầu của bóng khí bên trong và hạt ngoài được kí hiệu lần lượt là $R_i = [3V_i/(4\pi)]^{1/3}$ và $R_o = [3V_o/(4\pi)]^{1/3}$, ở đây V_i và V_o lần lượt là thể tích ban đầu của hạt bóng khí bên trong và hạt ngoài. Tại phía đáy của miền tính toán là khí lạnh với nhiệt độ T_{in} và vận tốc U_{in} được đưa vào. Để đơn giản hóa bài toán, ta giả sử rằng T_{in} bằng với T_0 – nhiệt độ ban đầu của pha khí xung quanh hạt. Không giống quá trình hóa rắn của một hạt lưu chất



Hình 4.1. Mô hình bài toán mô phỏng với một nửa hạt lưu chất rỗng đối xứng lơ lửng với dòng cường bức phía đáy của miền tính toán

đơn, hạt lưu chất rỗng có hai điểm chấp ba pha (Hình 4.1). Ở đây có sự xuất hiện của ba biên phân cách được kí hiệu là biên rắn-lỏng (tức là biên chuyên pha), biên rắn-khí và biên lỏng-khí. Trong mỗi pha, khối lượng riêng (ρ), độ nhớt (μ), hệ số dẫn nhiệt (k) và nhiệt dung riêng đẳng áp (C_p) cũng được giả sử là không đổi.

Các thông số không thứ nguyên được sử dụng trong bài toán này là

$$Pr = \frac{C_{pl}\mu_l}{k_l}, St = \frac{C_{pl}(T_m - T_c)}{L_h}, Re = \frac{\rho_l U_{in} R}{\mu_l}, We = \frac{\rho_l U_{in}^2 R}{\sigma} \quad (4.1)$$

$$R_{io} = \frac{R_l}{R_o}, \theta_0 = \frac{T_0 - T_c}{T_m - T_c}, \rho_{sl} = \frac{\rho_s}{\rho_l}, \rho_{gl} = \frac{\rho_g}{\rho_l}, \mu_{gl} = \frac{\mu_g}{\mu_l} \quad (4.2)$$

$$k_{sl} = \frac{k_s}{k_l}, k_{gl} = \frac{k_g}{k_l}, C_{psl} = \frac{C_{ps}}{C_{pl}}, C_{pgl} = \frac{C_{pg}}{C_{pl}}, \varepsilon_0 = \frac{z_{ci0} - z_{co0}}{R} \quad (4.3)$$

Để chọn độ phân giải lưới mô phỏng bài toán, ta khảo sát độ hội tụ lưới thông qua xem xét 4 lưới với miền tính toán $W \times H = 3R \times 12R$: 096×384 , 128×512 , 192×768 và 384×1536 . Các thông số là $St = 0,1$, $Pr = 0,01$, $Re = 50$, $We = 1$, $\rho_{sl} = 0,9$, $R_{io} = 0,6$, $r_0/R = 0,2$, $\varepsilon_0 = 0$, $\theta_0 = 0$, $\rho_{gl} = 0,05$, $\mu_{gl} = 0,05$, $k_{sl} = 0,5$, $k_{gl} = 0,01$, $C_{psl} = C_{pgl} = 1$. Bảng 4.1 thể hiện các sai số trung bình của tọa độ hướng tâm biên hóa rắn và chiều cao biên hóa rắn của các lưới khác nhau so với lưới mịn nhất là 384×1536 . Ta thấy rằng sai số trung bình của lưới 192×768 so với lưới 384×1536 ứng với sai số trung bình của tọa độ hướng tâm biên hóa rắn (1,155%) và sai số trung bình của chiều cao biên hóa rắn (0.128%) là nhỏ nhất và sai số này là chấp nhận được. Do đó, để tiết kiệm nguồn tính toán và thời gian trong khi

Bảng 4.1. Sai số trung bình của các lưới khác nhau so với độ phân giải lưới 384×1536

| Sai số trung bình (%) | Các độ phân giải lưới so với độ phân giải lưới 384×1536 | | |
|---|--|------------------|------------------|
| | 096×384 | 128×512 | 192×768 |
| Sai số trung bình của tọa độ hướng tâm biên hóa rắn | 3,843% | 2,973% | 1,155% |
| Sai số trung bình của chiều cao biên hóa rắn | 0,549% | 0,410% | 0,128% |

vẫn đảm bảo độ chính xác chấp nhận được, độ phân giải lưới 192×768 được lựa chọn để nghiên cứu bài toán.

Trong chương này, một vài các thông số không thứ nguyên chính ảnh hưởng lên quá trình hóa rắn của hạt lưu chất lỏng rỗng lơ lửng trong môi trường lạnh được xem xét. Các thông số đó là Re thay đổi trong dải 25 – 200, St trong dải 0,025 – 1,6, ρ_{sl} trong dải 0,8 – 1,2, kích thước nhân hóa rắn r_0/R trong dải 0,05 – 0,3, độ lệch tâm ban đầu ε_0 trong dải -0,15 – 0,3, R_{io} trong dải 0,2 – 0,7 và góc phát triển ϕ_{gr} trong dải 0° – 15° . Các thông số không thứ nguyên khác được giữ không đổi trong quá trình tính toán như $Pr = 0,01$, $We = 1$, $\theta_0 = 0$, $\rho_{gl} = 0,05$, $\mu_{gl} = 0,05$, $k_{sl} = 0,5$, $k_{gl} = 0,01$, $C_{psl} = C_{pgl} = 1$.

Kết luận chương 4

Trong chương này, quá trình hóa rắn của một hạt lưu chất lỏng rỗng lơ lửng dưới tác dụng của đối lưu cưỡng bức đã được trình bày.

Các thông số như số Reynolds (Re), số Stefan (St), tỉ số khối lượng riêng (ρ_{st}) giữa pha rắn và pha lỏng, kích thước nhân hóa rắn (r_0/R), độ lệch tâm ban đầu (ε_0), tỉ số bán kính (R_{io}) và góc phát triển (ϕ_{gr}) được xem xét.

Việc tăng số Re (tức là, tăng sự ảnh hưởng quán tính so với lực nhớt) trong dải 25 – 200, R_{io} (tức là, tăng kích thước hạt bóng khí bên trong) trong dải 0,2 – 0,7 và ϕ_{gr} trong dải 0° – 15° dẫn đến việc tăng thời gian hóa rắn (τ_s). Ngược lại, với sự giảm của số St (tức là, tăng nhiệt ẩn chuyển pha) trong dải 0,05 – 1,6, r_0/R (tức là, giảm kích thước nhân hóa rắn) trong dải 0,05 – 0,3 và ε_0 (tức là, hạt bóng khí gần nhân hóa rắn hơn) trong dải -0,15 – 0,3 dẫn đến quá trình hóa rắn kéo dài hơn. Trong khi đó, việc thay đổi tỉ số khối lượng riêng giữa pha rắn và pha lỏng (ρ_{st}) trong dải 0,8 – 1,2 có ảnh hưởng nhỏ lên thời gian hóa rắn.

Tỉ số hình dạng trong (Ar_i) không thay đổi nhiều khi các thông số thay đổi ngoại trừ việc thay đổi của ϕ_{gr} . Theo đó, việc tăng góc phát triển (ϕ_{gr}) làm giảm tỉ số hình dạng trong (Ar_i). Liên quan đến tỉ số hình dạng ngoài (Ar_o), việc tăng tỉ số khối lượng riêng (ρ_{st}) dẫn đến việc giảm tỉ số hình dạng ngoài (Ar_o). Mặt khác, tỉ số hình dạng ngoài (Ar_o) tăng với việc tăng góc phát triển. Các thông số khác như là St , Re , kích thước nhân hóa rắn (r_0/R), độ lệch tâm ban đầu (ε_0) của hạt và kích thước hạt bóng khí (R_{io}) bên trong có ảnh hưởng nhỏ lên hình dạng ngoài của hạt hóa rắn.

Các kết quả chính của chương 4 đã được công bố trong 1 bài báo đăng trên tạp chí quốc tế thuộc danh mục SCIE (Q1), cụ thể, bài báo số 5 trong “Danh mục các công trình khoa học của tác giả liên quan đến luận án”

KẾT LUẬN

Luận án đã thu được một số kết quả chính sau đây:

1. Đã xây dựng được một mô hình tính toán của hạt lưu chất rỗng hóa rắn trên một bề mặt lạnh và hạt lưu chất rỗng lơ lửng trong môi trường tự do được trình bày. Các mô hình này chưa được khảo sát trong bất kỳ một mô hình mô phỏng số nào khác.
2. Các thông số không thứ nguyên được đưa ra để khảo sát quá trình hóa rắn hạt lưu chất rỗng trên một bề mặt lạnh. Ta thấy rằng, việc thay đổi các thông số này có thể dẫn đến hình dạng và thời gian hóa rắn của hạt thay đổi. Qua đó, có thể giúp hiệu chỉnh và điều khiển quá trình hóa rắn của hạt lưu chất rỗng trên một bề mặt lạnh để ứng dụng trong công nghiệp.
3. Quá trình hóa rắn của của hạt lưu chất rỗng lơ lửng trong môi trường tự do dưới tác dụng của đối lưu cưỡng bức cũng được khảo sát. Qua đó thấy được hình dạng và thời gian hóa rắn của hạt lưu chất rỗng trong môi trường tự do cũng bị ảnh hưởng khi các thông số không thứ nguyên thay đổi. Do đó, qua khảo sát ảnh hưởng này có thể giúp hiệu chỉnh và điều khiển quá trình hóa rắn của hạt đơn nhân rỗng lơ lửng trong môi trường lạnh.

NHỮNG ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

Quá trình hóa rắn hạt lưu chất đơn đã được thực hiện nhiều thông qua mô phỏng số bằng phương pháp theo dấu biên. Các công trình mô phỏng hạt lưu chất rỗng chưa được thực hiện đến thời điểm hiện tại. Do đó, luận án có những điểm mới sau:

- Đã xây dựng được một mô hình tính toán của hạt lưu chất rỗng hóa rắn đặt trên một bề mặt lạnh và hạt lưu chất rỗng lơ lửng hóa rắn trong môi trường tự do. Cụ thể, hạt bóng khí hạt lưu chất được thêm vào bên trong hạt lưu chất tạo thành mô hình một hạt lưu chất rỗng. Từ đó, xuất hiện thêm một điểm chấp ba pha ở biên phía bên trong của hạt;
- Đã phân tích ảnh hưởng của các thông số không thứ nguyên đến quá trình hóa rắn của hạt lưu chất rỗng trên bề mặt lạnh. Qua đó, có thể điều chỉnh được hình dạng và thời gian hóa rắn của hạt lưu chất rỗng trên bề mặt lạnh đó bằng cách điều chỉnh các thông số không thứ nguyên;
- Đã phân tích ảnh hưởng của các thông số không thứ nguyên đến quá trình hóa rắn hạt lưu chất rỗng lơ lửng trong môi trường tự do dưới tác động của đối lưu cưỡng bức. Điều chỉnh các thông số không thứ nguyên này sẽ gây ra thay đổi về hình dạng và thời gian hóa rắn của hạt lưu chất rỗng lơ lửng trong môi trường tự do.

**DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ
LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN**

1. Nang X. Ho, Truong V. Vu, **Binh D. Pham**, *A numerical study of a liquid compound drop solidifying on a horizontal surface*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 165, nov. 2020, p. 120713 (SCIE, IF2020 = 5.584, Q1).
2. **Binh D. Pham**, Truong V. Vu, Lien V.T. Nguyen, Nang X. Ho, Cuong T. Nguyen, Hoe D. Nguyen, Vinh T. Nguyen and Hung V. Vu, *A numerical study of geometrical effects on solidification of a compound droplet on a cold flat surface*, Acta Mechanica, Vol. 232, jun. 2021, pp. 3767–3779 (SCIE, IF2020 = 2.698, Q1).
3. Truong V. Vu, **Binh D. Pham**, Phuc H. Pham, Hung V. Vu, and Bo X. Tran, *A numerical study of hollow water drop breakup during freezing*, Physics of Fluids, Vol. 33, oct. 2021, p. 112110 (SCIE, IF2021 = 4.98, Q1).
4. Truong V. Vu, **Binh D. Pham**, Nang X. Ho, Hung V. Vu, *Solidification of a hollow sessile droplet under forced convection*, Physics of Fluids, Vol. 34, Feb. 2022, p. 033302 (SCIE, IF2021 = 4.98, Q1).
5. **Binh D. Pham** and T. V. Vu, *A numerical study of a suspended compound droplet solidifying under forced convection*, Int. J. Heat Mass Transf, Vol. 196, p. 123296, Nov. 2022 (SCIE, IF2021 = 5.431, Q1).

6. **Pham Duy Binh**, Vu Van Truong, Nguyen Thi Viet Lien, Nguyen Tien Cuong, Nguyen Dinh Hoe, Nguyen Tuan Vinh, Vu Van Hung, *Direct numerical simulation study of water droplets freezing on a horizontal plate*, Vietnam J. Sci. Technol., vol. 59, no. 3, Art. no. 3, May 2021, doi: 10.15625/2525-2518/59/3/15434.

7. **Binh D. Pham**, Truong V. Vu, Lien V.T. Nguyen, Cuong T. Nguyen, Hoe D. Nguyen, Vinh T. Nguyen, Hung V. Vu, *A numerical study of the solidification process of a retracting fluid filament*, Vietnam J. Mech., Nov. 2021, doi: 10.15625/0866-7136/16393.